

УДК 669.018.44

Ф.Н. Карачевцев<sup>1</sup>, В.И. Титов<sup>1</sup>

**РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ СОСТАВА  
ЖАРОСТОЙКИХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ  
ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА КАТОДОВ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ  
РАБОЧИХ И СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК ГТД**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-14-22

*Разработана технология изготовления и производства материала стандартных образцов состава жаростойких сплавов на основе никеля марок СДП-1, СДП-2, ВСПД-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8. Разработана и аттестована МИ 1.2.027–2011 «Методика измерений массовой доли легирующих элементов рентгенофлуоресцентным методом в жаростойких сплавах», устанавливающая процедуру выполнения измерений массовой доли легирующих элементов в жаростойких сплавах на никелевой основе указанным методом. Проведена регистрация отраслевого стандартного образца жаростойких сплавов на основе никеля СДП-1, СДП-2, ВСПД-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 в Системе добровольной сертификации стандартных образцов веществ и материалов.*

**Ключевые слова:** никелевые сплавы, стандартные образцы, технология изготовления, методика измерений, рентгенофлуоресцентный метод, ионно-плазменные покрытия.

F.N. Karachevtsev<sup>1</sup>, V.I. Titov<sup>1</sup>

**DEVELOPMENT OF STANDARD SAMPLES OF THE COMPOSITION  
OF HEAT-RESISTANT NICKEL-BASED ALLOYS  
FOR SPECTRAL ANALYSIS OF CATHODES USED FOR ION-PLASMA  
COATINGS OF GTE WORKING AND NOZZLE BLADES**

*In the work, the development of technologies for the manufacture and production of standard samples of heat-resistant nickel-based alloys: SDP-1, SDP-2, VSPD-9, VZhL-2, AZh-8. Developed and certified by MI 1.2.027–2011 «Method of measuring alloying elements by x-ray fluorescence method in heat-resistant alloys» establishes the measurement of the dimensions of alloying elements in heat-resistant nickel-based alloys by x-ray fluorescence method. The registration of the RSA of heat-resistant nickel-based alloys SDP-1, SDP-2, VSPD-9, VZhL-2, AZh-8 in the System of voluntary certification of standard samples of materials and materials.*

**Keywords:** nickel alloys, reference materials, manufacturing technology, measurement technique, x-ray fluorescence method, ion-plasma coatings.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Авиационно-космическая промышленность Российской Федерации постоянно требует совершенствования технологий и контроля качества разрабатываемых авиационных материалов. Для нового поколения изделий необходимы материалы с комплексом улучшенных служебных характеристик по всем параметрам летательных аппаратов

разного назначения, применение которых в конструкциях авиационной техники позволяет реализовать многие передовые проекты. При этом важно, чтобы данные материалы обеспечивали экономичность, безопасное воздействие на окружающую среду, высокие технические показатели различных изделий и узлов авиационной техники.

Количество новых марок жаропрочных никелевых сплавов с улучшенными характеристиками постоянно увеличивается [1–3]. Для повышения жаростойкости никелевых сплавов разработан целый ряд композиций данной категории сплавов для нанесения ионно-плазменных покрытий [4, 5]. Контроль качества этих материалов проводится методами традиционной аналитической химии из жидких проб с растворением образцов в смеси кислот. Такая процедура позволяет фиксировать финишный состав материала.

Для обеспечения единства измерений и контроля качества материалов и полуфабрикатов из них необходимо изготовление стандартных образцов (СО) состава сплавов.

Цель данной работы – разработка СО состава материала. Разработанные и аттестованные в установленном порядке СО позволят проводить анализ материала катодов в экспресс-режиме в ходе производственной плавки, что способствует оперативному корректированию при необходимости состава композиции [6, 7]. Такой анализ проводится с использованием современного химико-аналитического оборудования – оптико-эмиссионного спектрометра Magellan Q8 и рентгенофлуоресцентного анализатора типа S4 Explorer. Однако корректные и достоверные результаты на таком оборудовании можно получить только при наличии СО состава соответствующих марок сплавов. В настоящее время в отрасли практически отсутствуют комплекты СО состава сплавов для спектрального анализа катодов, предназначенных для нанесения ионно-плазменных покрытий.

Процедура разработки и изготовления СО состава сплавов имеет несколько стадий.

Для получения однородных по составу СО заданного химического состава, а также для методического обеспечения их применения необходимо следующее:

- разработка технологии выплавки материала СО состава жаростойких сплавов на основе никеля;
- выпуск пяти комплектов СО категории ОСО (отраслевой стандартный образец) состава жаростойких сплавов на основе никеля СДП-1, СДП-2, ВСПД-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 с паспортами и инструкциями по применению СО для спектрального анализа катодов, используемых для нанесения ионно-плазменных покрытий рабочих и сопловых лопаток ГТД;
- разработка и аттестация методик измерений массовой доли легирующих элементов рентгенофлуоресцентным методом в жаростойких сплавах [8–10], обеспечивающих необходимую точность спектрального анализа материала катодов в пределах 1–3 % отн., а также уровень погрешности определения содержания примесей не более 10 % отн.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [11].

### Материалы и методы

Объектами исследования являются материалы СО состава жаростойких сплавов на основе никеля СДП-1, СДП-2, ВСПД-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8.

Все СО представляют собой цилиндры диаметром 40 мм и высотой 30 мм. На рисунке представлены комплекты образцов никелевых сплавов СДП-1, ВСПД-9 и АЖ-8.



Комплекты стандартных образцов никелевых сплавов марок СДП-1 (а), ВСДП-9 (б) и АЖ-8 (в)

В работе использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр S4 Explorer. Для достижения максимальных аналитических сигналов определяемых элементов выполняли автоматическую настройку параметров работы прибора в соответствии со стандартной процедурой его подготовки, заданной производителем:

Параметр прибора	Значение параметра
Напряжение высоковольтного генератора, кВ:	
легкие элементы (<26 (Fe))	30
тяжелые элементы (>26 (Fe))	60
Ток высоковольтного генератора, мА:	
легкие элементы (<26 (Fe))	80
тяжелые элементы (>26 (Fe))	40
Мощность высоковольтного генератора, кВт	4,0
Материал анода рентгеновской трубки	Rh
Кристаллы-анализаторы	LiF 200, LiF 220, XS-Ge-C, PET, XS-CEM, XS-55, XS-B
Коллиматоры, градус	0,23; 0,46; 2,0; 0,12
Коллиматорные маски, мм	34, 28, 18, 5
Детекторы	Проточный пропорциональный счетчик, сцинтилляционный счетчик
Число реплик для образца	10
Экспозиция, с	200

Исследования методом эмиссионной спектроскопии проводили на оптико-эмиссионном спектрометре Varian 730 ES с индуктивно связанной плазмой по ГОСТ 6012–98, ГОСТ 8776–2010, МИ 1.2.036–2011, МИ 1.2.037–2011 и МИ 1.2.038–2011. По ГОСТ 6689 и ГОСТ 11739 осуществляли исследования методом атомной абсорбции на атомно-абсорбционном спектрометре Varian 240 FS и проводили химический анализ на спектрофотометре ПЭ-5400В. Масс-спектрометрические исследования выполняли на масс-спектрометрах с индуктивно связанной плазмой PQ3 и XSeries 2 по МВИ 1.2.010–2009.

## Результаты и обсуждение

### *Разработка технологии изготовления материала СО состава жаростойких сплавов на основе никеля*

В результате выполнения данного этапа исследований отработаны технологии выплавки материала СО (по 4 образца различного состава) жаростойких сплавов на основе никеля СДП-1, СДП-2, ВСДП-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 для спектрального анализа катодов. Выбор и расчет шихтовых составов СО проводили таким образом, чтобы был охвачен весь диапазон содержания основных легирующих элементов и примесей по ТУ 1-595-2-889–2005 и ТУ 1-595-2-890–2005 согласно ГОСТ 8.315–2019. Изготовленные на основании данного расчета СО позволяют определить состав производственных плавов и сделать заключение о соответствии или несоответствии указанных сплавов требованиям ТУ.

Слитки из жаропрочных никелевых сплавов выплавляли диаметром 90 мм и высотой 300 мм с последующим переплавом, режим которого выбирали из расчета обеспечения литейной плотности заготовок диаметром 42 мм. Температура над ванной расплава составляла 1400 °С, скорость вытягивания формы 5 мм/мин.

Проведены рентгенографические исследования материала СО сплавов СДП-1, СДП-2, ВСДП-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8. По результатам рентгенофлуоресцентного анализа установлено, что в материале СО отсутствуют поры, полости, трещины и другие дефекты.

Таким образом, отработанная технология выплавки и отливки позволяет получать монолитные и однородные по составу заготовки материала СО жаростойких сплавов на основе никеля, которые обрабатывали на токарных станках. В результате получены СО жаростойких сплавов на основе никеля в форме цилиндров диаметром 40 мм и высотой 30 мм.

На основании отработанных режимов выплавки и отливки разработаны технологические инструкции на изготовление СО состава жаростойких сплавов, которые устанавливают требования к оборудованию и шихтовым материалам, а также безопасности и охраны окружающей среды.

### *Разработка СО категории ОСО состава жаростойких сплавов на основе никеля*

Исследование однородности химического состава полученного материала СО сплавов СДП-1, СДП-2, ВСДП-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 проводили по ГОСТ 8.531–2002 рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S4 Explorer – по два параллельных измерения с каждой рабочей поверхности материала. По результатам определений в соответствии с методикой расчета, приведенной в ГОСТ 8.531–2002, получены значения характеристик однородности материала СО указанных сплавов, которые не превышают допустимых значений, что свидетельствует об однородности материала СО по химическому составу (табл. 1 и 2).

Таблица 1

#### **Характеристика погрешности, обусловленной неоднородностью стандартных образцов (СО) состава сплава ВСДП-9**

Индекс СО	Значения погрешности для элементов, % отн.					
	Al	Cr	Y	Ta	Fe	Cu
ВСДП-9-1	0,9	1,2	2,5	0,9	6,3	0,9
ВСДП-9-2	1,4	0,8	12,4	1,4	3,6	1,4
ВСДП-9-3	1,2	2,6	2,1	1,2	0,7	0,8
ВСДП-9-4	0,3	0,4	12,8	0,3	1,2	0,3

**Характеристика погрешности, обусловленной неоднородностью  
стандартных образцов (СО) состава сплава АЖ-8**

Индекс СО	Значения погрешности для элементов, % отн.							
	Cr	Al	Y	W	Ta	Hf	Si	Fe
АЖ-8-1	1,4	1,9	1,7	1,5	1,0	3,1	1,2	0,7
АЖ-8-2	1,2	1,5	1,4	1,9	1,0	1,6	1,7	1,4
АЖ-8-3	0,5	1,2	1,2	1,2	0,9	8,9	2,1	0,6
АЖ-8-4	1,0	1,4	1,3	0,6	0,7	1,9	2,0	0,5

Определение количественного химического состава СО сплавов СДП-1, СДП-2, ВСДП-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 проводили методами атомно-абсорбционной, атомно-эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой [12–14], а также традиционными методами химического анализа.

Организацией-соисполнителем ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» выполнена составная часть НИР «Определение химического состава комплектов стандартных образцов состава для спектрального анализа жаростойких сплавов». При этом значения массовых долей химических элементов материалов СО сплавов хорошо согласуются с результатами, полученными во ФГУП «ВИАМ».

На основании анализа результатов определения массовой доли элементов в материалах СО жаростойких сплавов, полученных во ФГУП «ВИАМ» и ФГУП «ЦНИИЧермет», для разработки комплектов СО категории ОСО состава жаростойких сплавов на основе никеля СДП-1, СДП-2, ВСДП-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 для спектрального анализа катодов оценены метрологические характеристики СО по ГОСТ 8.532–2002, а именно: аттестованные значения и их погрешности. Установлено, что аттестованные значения охватывают весь диапазон содержания основных легирующих элементов и примесей и выходят за пределы на 10–12 %, указанные в ТУ по нижнему и верхнему уровням, что обеспечивает градуировку спектрального оборудования во всем диапазоне элементов по ТУ на сплавы.

Составлены и переданы во ФГУП «УНИИМ» для проведения метрологической экспертизы технические задания на разработку СО, включающие технические требования к образцам, а также программу и методику их аттестации, научно-технические отчеты, содержащие сведения о результатах разработки СО, протоколы испытаний, проведенных во ФГУП «ВИАМ» и ФГУП «ЦНИИЧермет», оформленные проекты паспортов с инструкциями по применению, проекты описания образцов и этикетки на каждый комплект СО.

Метрологическая экспертиза и регистрация комплектов ОСО жаростойких сплавов проведена ФГУП «УНИИМ» в Системе добровольной сертификации стандартных образцов веществ и материалов. Выполнена также аттестация методики измерений массовой доли легирующих элементов в жаростойких сплавах, на которые разрабатывали СО.

*Разработка и аттестация методики измерения  
массовой доли легирующих элементов  
рентгенофлуоресцентным методом в жаростойких сплавах*

При выполнении данного этапа работы выбраны аналитические линии, проведены настройки средства измерения (рентгенофлуоресцентного спектрометра S4 Explorer) для определения и сбора статистических данных по легирующим элементам и примесям в жаростойких сплавах рентгенофлуоресцентным методом. Рассчитаны

метрологические характеристики по РМГ 61–2003 (рекомендации по Межгосударственной стандартизации) «Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа» для дальнейшей аттестации методики измерений (табл. 3).

Таблица 3

**Метрологические характеристики методики измерения  
(при доверительной вероятности 0,95)**

Элемент	Массовая доля, %	Повторяемость $\sigma_r$	Предел повторяемости $r$	Воспроизводимость $\sigma_R$	Предел воспроизводимости $R$	Границы погрешности $\Delta$
Al	От 9,00 до 15,00 включительно	0,020	0,050	0,040	0,120	0,240
Co	От 16,00 до 25,00 включительно	0,030	0,080	0,130	0,350	0,420
Cr	От 16,00 до 25,00 включительно	0,050	0,130	0,080	0,230	0,480
Y	От 0,25 до 1,00 включительно	0,001	0,002	0,002	0,004	0,023
Fe	От 0,15 до 1,00 включительно	0,001	0,003	0,005	0,015	0,014
Si	От 0,40 до 1,00 включительно	0,004	0,011	0,005	0,014	0,035

Во ФГУП «УНИИМ» переданы текст методики и отчет об исследовании метрологических характеристик методики измерений. Проведены проверка текста методики на соответствие требованиям ГОСТ Р 8.563–2009, экспертиза расчетов метрологических характеристик методики, указанных в отчете, а также аттестация «Методики измерений массовой доли легирующих элементов в жаростойких сплавах рентгенофлуоресцентным методом».

После проведения экспертизы всего комплекта документации ФГУП «УНИИМ» передало во ФГУП «ВИАМ» аттестованную «Методику измерений массовой доли легирующих элементов в жаростойких сплавах рентгенофлуоресцентным методом» и свидетельство № 222.0336/01.00258/2011 об ее аттестации.

Методика измерений является руководством по определению массовой доли легирующих элементов в жаростойких сплавах на никелевой основе и устанавливает процедуру выполнения измерений их содержания в следующих диапазонах, % (по массе): 9–15 алюминия; 16–25 кобальта; 16–25 хрома; 0,25–1 иттрия; 0,4–1,0 кремния и 0,15–1,0 железа.

При проведении рентгенофлуоресцентного анализа погрешность при определении массовой доли легирующих элементов не превышает 3 % отн., а массовой доли примесей: 10 % отн.

На рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 Explorer по аттестованным значениям массовой доли элементов СО жаростойких сплавов на никелевой основе построены линейные градуировочные зависимости. Рассчитанные относительные погрешности с использованием градуировочных зависимостей при определении массовой доли легирующих элементов не превышают 3 %, а массовой доли примесей: 10 %.

Метрологические характеристики СО категории ОСО на примере сплавов АЖ-8 и ВЖЛ-2 представлены в табл. 4–7.

Таблица 4

**Аттестованная характеристика стандартных образцов (СО)  
состава жаростойкого сплава АЖ-8**

Индекс СО в составе комплекта	Массовая доля элементов, % (по массе)								
	Cr	Al	Y	W	Ta	Hf	Si	Fe	Cu
АЖ-8-1	11,78	9,93	0,039	5,27	4,08	1,92	0,981	0,119	0,0080
АЖ-8-2	14,27	8,98	1,027	4,34	2,98	0,97	0,600	0,126	0,0136
АЖ-8-3	15,89	6,24	0,345	3,32	5,45	1,69	0,302	0,330	0,0301
АЖ-8-4	13,16	7,43	0,643	2,49	6,73	1,37	0,801	0,513	0,0447

Таблица 5

**Абсолютная погрешность аттестованных значений стандартных образцов (СО) состава жаростойкого сплава АЖ-8 (при доверительной вероятности 0,95)**

Индекс СО в составе комплекта	Абсолютная погрешность массовой доли элементов, % (по массе)								
	Cr	Al	Y	W	Ta	Hf	Si	Fe	Cu
АЖ-8-1	0,37	0,38	0,002	0,18	0,09	0,15	0,026	0,003	0,0030
АЖ-8-2	0,36	0,27	0,037	0,18	0,08	0,07	0,021	0,004	0,0005
АЖ-8-3	0,17	0,15	0,010	0,08	0,11	0,32	0,018	0,009	0,0009
АЖ-8-4	0,27	0,21	0,025	0,06	0,12	0,06	0,032	0,009	0,0016

Таблица 6

**Аттестованная характеристика стандартных образцов (СО) состава жаростойкого сплава ВЖЛ-2**

Индекс СО в составе комплекта	Массовая доля элементов, % (по массе)									
	C	Si	Cr	Mo	W	Ti	Al	Fe	B	P
ВЖЛ-2-1	0,0345	1,20	10,11	16,80	6,63	3,72	1,89	4,13	0,012	0,0011
ВЖЛ-2-2	0,1510	0,61	12,27	14,82	9,22	1,52	3,55	2,37	0,026	0,0020
ВЖЛ-2-3	0,2530	1,78	15,93	12,87	9,62	2,14	1,19	3,24	0,052	0,0201
ВЖЛ-2-4	0,1210	2,47	13,29	10,63	10,82	3,17	2,71	1,52	0,117	0,0456

Таблица 7

**Абсолютная погрешность аттестованных значений стандартных образцов (СО) состава жаростойкого сплава ВЖЛ-2 (при доверительной вероятности 0,95)**

Индекс СО в составе комплекта	Абсолютная погрешность массовой доли элементов, % (по массе)									
	C	Si	Cr	Mo	W	Ti	Al	Fe	B	P
ВЖЛ-2-1	0,0006	0,05	0,10	0,14	0,13	0,11	0,03	0,04	0,002	0,0003
ВЖЛ-2-2	0,0040	0,03	0,21	0,13	0,14	0,03	0,09	0,04	0,001	0,0001
ВЖЛ-2-3	0,0090	0,05	0,14	0,20	0,34	0,02	0,05	0,04	0,002	0,0011
ВЖЛ-2-4	0,0080	0,15	0,22	0,36	0,62	0,10	0,18	0,03	0,016	0,0030

**Заключения**

Разработаны технологические инструкции на изготовление (выплавку и отливку заготовок) СО состава жаростойких сплавов на основе никеля СДП-1, СДП-2, ВСДП-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 с применением метода высокоградиентной направленной кристаллизации, которые обеспечили получение однородных СО заданного химического состава.

В двух аккредитованных испытательных центрах – ФГУП «ВИАМ» и ФГУП «ЦНИИЧермет» для аттестации СО проведены исследования химического состава жаростойких сплавов на основе никеля СДП-1, СДП-2, ВСДП-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 методами химического и спектрального анализа.

Установлено, что значения массовой доли элементов в материалах СО, полученные во ФГУП «ЦНИИЧермет», хорошо согласуются с результатами, полученными во ФГУП «ВИАМ». На основании результатов определения массовой доли элементов в материалах СО, полученных в указанных центрах, рассчитаны метрологические характеристики образцов по ГОСТ 8.532–2002.

Разработаны паспорта с инструкциями по применению СО категории ОСО состава жаростойких сплавов на основе никеля СДП-1, СДП-2, ВСДП-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 для спектрального анализа катодов, а также «Методика измерений массовой доли легирующих элементов рентгенофлуоресцентным методом в жаростойких сплавах», которая

устанавливает процедуру выполнения измерений содержания легирующих элементов в следующих диапазонах, % (по массе): 9–15 алюминия; 16–25 кобальта; 16–25 хрома; 0,25–1 иттрия; 0,4–1,0 кремния и 0,15–1,0 железа.

При проведении рентгенофлуоресцентного анализа погрешность при определении массовой доли легирующих элементов не превышает 3 % отн., а массовой доли примесей: 10 % отн.

Во ФГУП «УНИИМ» проведены аттестация «Методики измерений массовой доли легирующих элементов в жаростойких сплавах» и метрологическая экспертиза документов на разработку СО каждого сплава, а также регистрация ОСО жаростойких сплавов на основе никеля (СДП-1, СДП-2, ВСПД-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8) в Системе добровольной сертификации стандартных образцов веществ и материалов. Выполнена аттестация МИ 1.2.027–2011 «Методика измерений массовой доли легирующих элементов в жаростойких сплавах рентгенофлуоресцентным методом».

Выпущено 30 комплектов СО категории ОСО состава жаростойких сплавов на основе никеля (СДП-1, СДП-2, ВСПД-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8) для спектрального анализа катодов, используемых для нанесения ионно-плазменных покрытий рабочих и сопловых лопаток ГТД.

Разрабатываемые комплекты монолитных СО позволят проводить градуировку аналитического оборудования с целью повышения точности измерений химического состава производственных плавок, контроля качества получаемых полуфабрикатов (отбраковка материала, состав которого не соответствует заданному составу), значительного снижения трудоемкости (по сравнению с химическими методами анализа) и сокращения продолжительности выполнения измерений массовой доли элементов в металлургическом и авиационном производстве полых катодов, применяемых при ионно-плазменном напылении покрытий на лопатки и детали ГТД.

Выпускаемые и разрабатываемые СО позволят проводить производственный контроль химического состава сплавов на основе никеля марок СДП-1, СДП-2, ВСПД-9, ВЖЛ-2 и АЖ-8 (а также сплавов, близких по химическому составу) неразрушающими методами анализа, что исключает использование кислот и их выбросы в атмосферу и водостоки.

#### Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
2. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
3. Базылева О.А., Оспенникова О.Г., Аргинбаева Э.Г., Летникова Е.Ю., Шестаков А.В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.
4. Мубояджян С.А., Будиновский С.А. Ионно-плазменная технология: перспективные процессы, покрытия, оборудование // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 39–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-39-54.
5. Косьмин А.А., Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Жаро- и коррозионностойкое покрытие для рабочих лопаток турбины из перспективного жаропрочного сплава ВЖЛ21 // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 1 (46). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-17-24.

6. Каблов Е.Н., Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Муравская Н.П. Оценка соответствия новых материалов с использованием СО и МИ высокого уровня // Компетентность. 2017. № 2. С. 40–46.
7. Дворецков Р.М., Петров П.С., Орлов Г.В., Карачевцев Ф.Н., Летов А.Ф. Стандартные образцы новых марок жаропрочных никелевых сплавов и их применение для спектрального анализа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 11. С. 15–22.
8. Handbook of x-ray spectrometry / ed. R.E. Van Grieken, A.A. Marcowicz. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2001. P. 14–56.
9. Criss J.W., Birks L.S. Calculation methods for fluorescent X-ray spectrometry. Empirical coefficients vs. fundamental parameters // Analytical Chemistry. 1968. Vol. 40. P. 1080–1086.
10. Машин Н.И., Лебедева Р.В., Туманова А.Н. Рентгенофлуоресцентный анализ систем Ni–Fe–Mn–Cr // Аналитика и контроль. 2004. Т. 8. № 2. С. 160–164.
11. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
12. Карачевцев Ф.Н., Алексеев А.В., Летов А.Ф., Дворецков Р.М. Плазменные методы анализа элементного химического состава никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 483–497. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-483-497.
13. Дворецков Р.М., Барановская В.Б., Мазалов И.С., Карачевцев Ф.Н. Применение атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой для анализа электролитов при электролитической экстракции фаз никелевых сплавов // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 12. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 17.03.2021). DOI: 18577/2307-6046-2018-0-12-107-120.
14. Дворецков Р.М., Волкова О.С., Радзиковская В.Н., Бутова В.Н. Определение бериллия в современных авиационных материалах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // Труды ВИАМ. 2016. № 4 (40). Ст. 05. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 17.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-5-5.
15. Черникова И.И., Тюмнева К.В., Бакалдина Т.В., Ермолаева Т.Н. Совершенствование пробоподготовки при анализе ферросплавов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 5. С. 11–17.